

자율주행 무인차량용 레이더 신호처리부 개발 및 성능 분석

Development and Performance Analysis of Radar Signal Processing for Autonomous Unmanned Ground Vehicle

신 승 용* 최 준 혁* 박 상 현** 엄 동 진** 김 정 렬**
 Seung-Yong Shin Jun-Hyeok Choi Sang-Hyun Park Dong-Jin Yeom Jeong-Ryul Kim

ABSTRACT

In this paper, we present signal processing procedure and carry out performance analysis of FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) radar for Autonomous Unmanned Vehicle(AUV). In order to detect range profile and velocity of the unknown target, we must implement two step FFT(Fast Fourier Transform) procedure. And the DBF(Digital Beam Forming) algorithm has to be performed to obtain the angle information of the unknown target. To verify the performance of manufactured autonomous unmanned ground vehicle FMCW radar, we use the data of the real corner reflector target.

Keywords : Radar Signal Processing(레이더 신호처리), FMCW(주파수 변조 지속파), FFT(고속 푸리에 변환), AUV(자율주행 무인 차량), DBF(디지털 빔형성)

1. 서 론

자율주행 무인차량은 운전자의 조작 없이 스스로 주변의 외부환경을 인지하여 다른 차량이나 사람 등의 장애물을 감지하여, 장애물을 피해 자율적인 주행이 가능하도록 하는 차량을 말한다. 자율주행 무인차량의 장애물을 감지하기 위해 사용되는 FMCW 레이더는 외부환경의 영향을 받지 않고 장애물 표적의 거리 및 속도를 측정할 수 있는 장비로서 차량용 충돌 방지 시스템과 일반 표적 탐지 시스템에서 활용 된다^[1,2]. 자율주

행 무인차량의 충돌방지 시스템은 차량 근방에 존재하는 장애물을 인지하여 미연에 충돌을 방지하는 것을 목적으로 하고 있으며, 초음파 및 카메라 그리고 레이저 센서 등이 대표적인 충돌 방지 시스템으로 사용되고 있다. 초음파 센서는 공기에 의한 감쇄가 크고 직진성이 나빠서 표적을 탐지하는데 있어서 문제가 발생할 수 있으며, 카메라는 야간이나 날씨의 영향을 많이 받는다. 또한 레이저 센서는 안개나 우천시 성능이 현저하게 떨어지고 다중 표적을 탐지하는데 있어서 어려움이 있다. 이에 반해서 FMCW 레이더는 날씨와 주·야 상관없이 표적을 탐지할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 차량용 충돌 방지 시스템에 사용되고 있다.

무인차량용 FMCW 레이더는 선형적으로 주파수가 변조된 송신 신호와 표적에 의해서 반사된 수신 신호

† 2013년 3월 21일 접수~2013년 7월 26일 게재승인
 * LIG넥스원 ISR 연구센터(ISR Research Center, LIGnex1)
 ** 국방과학연구소(ADD)
 책임저자 : 신승용(seungyong.shin@lignex1.com)

의 주파수 차이를 이용하여 표적의 거리, 속도 및 방위각 정보를 추출하는 방식이다³⁻⁵⁾.

본 논문에서는 자율주행 무인차량용 FMCW 레이더의 디지털 신호 처리를 통해 정지 및 이동 표적을 탐지하여 표적 정보(거리, 속도, 방위각)를 추출하는 신호처리 절차를 소개하고 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 FMCW 레이더 신호처리 절차를 적용한 신호처리기를 제작하여 실제 시험을 통한 성능 분석에 대한 결과를 나타내었다.

2. 본론

가. FMCW 레이더 개요

FMCW 레이더에서 표적 정보를 추출하기 위한 차이 주파수는 표적으로부터 반사된 수신 신호와 기준(reference) 신호인 송신 신호의 곱을 이용한 방식을 사용하여 추출한다. Fig. 1은 FMCW 레이더의 송신 신호와 수신 신호를 나타낸다. 곱해진 신호는 저대역 주파수 통과 필터를 지나면 합주파수는 제거되고 차주파수만 남게 되는데 이를 비트 주파수(f_r , beat frequency)라 한다⁶⁾. 비트 주파수는 다음의 수식 (1)에서 알 수 있듯이 레이더와 표적간의 거리정보를 포함하고 있다.

$$R = \frac{cTf_r}{4\pi BW} \quad (1)$$

여기서 BW 는 주파수의 변조폭 또는 대역폭을 나타내며, T 는 변조주기 또는 신호폭을 나타낸다. c 는 빛의 속도로 3×10^8 m/sec 주어진다.

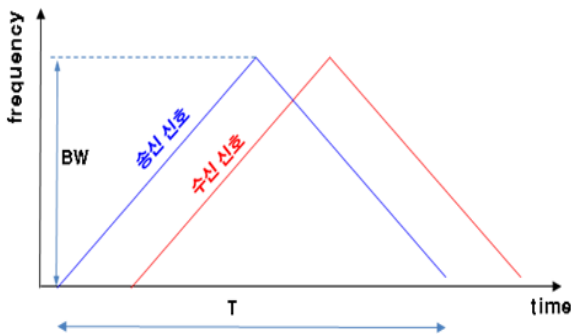


Fig. 1. Transmitted and received signal of FMCW radar

나. FMCW 레이더 신호에 대한 모델

FMCW 레이더는 송신 신호와 수신 신호의 곱을 이용한 방식을 바탕으로 표적에 대한 정보를 획득한다. 따라서 본 절에서는 FMCW 레이더의 송신 신호와 수신 신호에 대해서 자세히 기술하도록 한다. FMCW 레이더의 송신 신호는 다음의 수식 (2)와 같이 표현한다.

$$s(t) = \cos\left(2\pi\left(f_0t + \frac{BW}{2T}t^2\right)\right), 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

여기서 BW 는 대역폭을 나타내며, T 는 FMCW 레이더의 신호폭으로 33 μ sec이다. Fig. 2는 FMCW 레이더의 시간 영역에서의 송신 신호를 나타낸다.

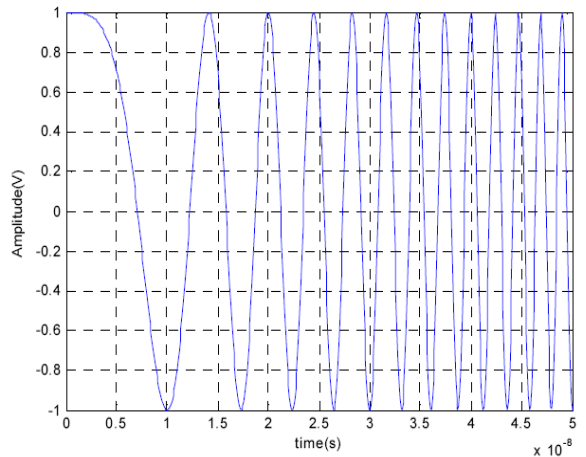


Fig. 2. FMCW radar transmitted signal in the time domain

FMCW 레이더의 수신 신호는 다음의 수식 (3)과 같이 정의되며, 송신신호가 거리 R 만큼의 지연된 신호로 표현된다.

$$r(t) = A \cos\left(2\pi\left(\frac{f_0(t-2R/c)}{+ \frac{BW}{2T}(t-2R/c)^2}\right)\right) \quad (3)$$

여기서 A 는 수신 신호의 크기를 나타내며, $2R/c$ 는 반사체에 의한 시간 지연(time delay)을 나타낸다. R 은 실제 레이더와 반사체의 거리이고 c 는 빛의 속도를 나타낸다.

신호 처리부에서 수신 신호가 믹서기(mixer)를 통해서 송신 신호와 곱해진 다음 저주파 대역 통과 필터를 통과하게 되면 수신 신호는 시간 지연에 비례해서 일정 주파수를 갖는 정현파 신호로 변하게 되며 다음의 수식 (4)과 같이 나타난다.

$$s'(t) = A \cos\left(\frac{4\pi R \cdot BW}{cT}t + f_0 \frac{4\pi R}{ct}\right) \quad (4)$$

위의 수식 (4)에서 구한 정현파 신호를 고속 푸리에 변환(fast fourier transform)을 이용하면 레이더와 반사체간의 거리를 구할 수 있다.

다. FMCW 레이더 신호처리부의 구성

차량용 FMCW 레이더의 신호 처리부는 레이더 처리 모듈과 레이더 제어 모듈로 구성되어 있다. 레이더 처리 모듈은 FPGA를 기반으로 송수신 모듈에서 ADC로부터 데이터를 획득하고 거리, 속도 및 방위각의 정보를 예측한다. 레이더 제어 모듈은 레이더의 운영을 제어하고 방위각 분해를 위한 알고리즘 구현이 되어 있다. 자율주행 무인차량용 FMCW 레이더의 신호 처리부에 대한 블록도는 Fig. 3에서 자세하게 나타내었다.

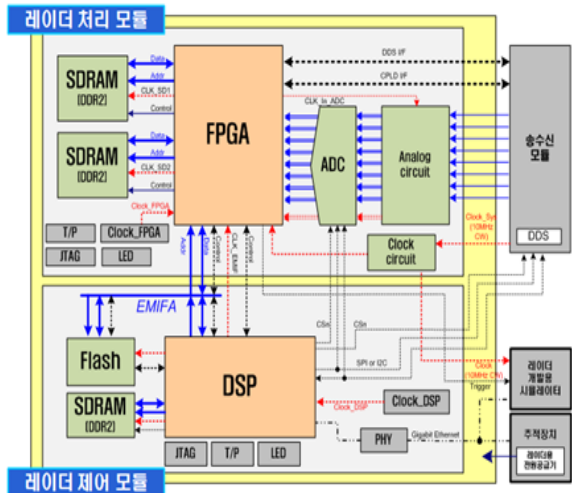


Fig. 3. Block diagram of FMCW radar signal processing

Table 1은 개발한 FMCW 레이더의 신호처리부의 기능을 나타낸 것으로 레이더 처리모듈과 레이더 제어 모듈로 구분하였다.

Table 1. The function of FMCW radar signal processing

구분	기능
레이더 처리모듈	<ul style="list-style-type: none"> 송수신 모듈을 통해 ADC로부터 8 채널 데이터 획득 FPGA 내부에 구현된 알고리즘을 통해 거리, 속도, 각도 추정 자기 속도 보상 알고리즘을 통해 속도 보상 CFAR 탐지를 통해 타겟 Hit 정보 생성
레이더 제어모듈	<ul style="list-style-type: none"> 레이더 운영 제어 추적 장치와의 연동을 통해 레이더 전체 제어

라. FMCW 레이더 신호처리 절차

표적의 거리와 속도의 정보를 획득하기 위해서는 2 단계의 FFT(Fast Fourier Transform) 절차를 수행해야 하며, 방위각의 정보를 획득하기 위해서는 디지털 빔포밍 알고리즘을 수행해야 한다. Fig. 4는 본 논문에서 제안한 FMCW 레이더의 신호처리 절차를 나타내었다.

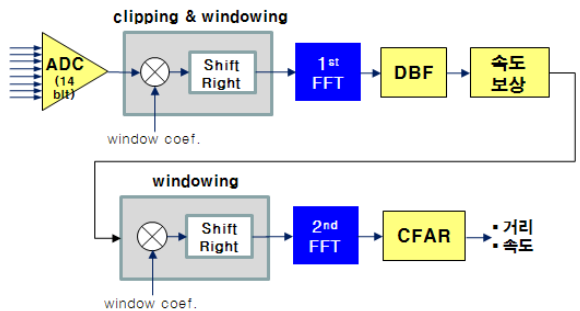


Fig. 4. The procedure of FMCW radar signal processing

FMCW 레이더의 신호처리에 대한 절차는 디지털 신호처리를 통해 정지 표적 및 이동 표적을 탐지하여 표적의 정보(거리, 속도, 방위각)를 추출하기 위해서 고속 푸리에 변환 신호처리 알고리즘을 이용하였다.

거리 정보를 획득하기 위해서는 우선 수신된 각 칩(chirp)열에서 1st FFT를 수행하고, 속도 정보를 획득하기 위해서는 수신된 칩(chirp)열을 누적한 후 2nd FFT를 수행한다. DBF(Digital Beam Forming)는 채널간의

위상보상을 한 후에 디지털 빔 형성으로 방위각 방향의 빔 번호(방위각) 획득하기 위해서 사용한다.

Fig. 5는 디지털 빔포밍의 형성 원리를 나타내고 있으며, 수신된 각 채널에 보정값을 곱하여 구현할 수 있으며 보정값은 다음의 수식 (5)와 같이 나타낸다.

$$w_n = cal\ factor \times window \times \exp(-jn\phi) \quad (5)$$

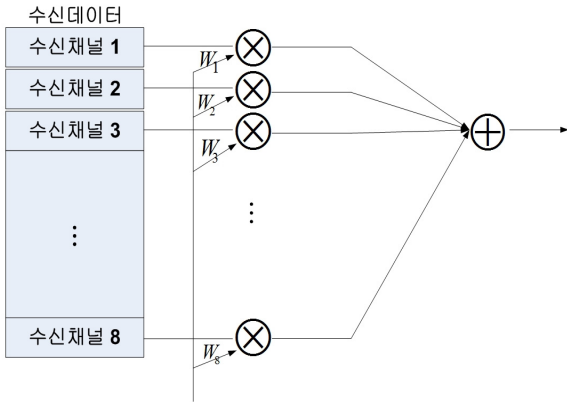


Fig. 5. Fundamental principles of digital beamforming

Fig. 6은 디지털 빔 포밍(digital beamforming)의 형성 결과는 나타내고 있으며, 방위각 부엽수준을 결정하기 위해 -27 dB Taylor 분포를 적용하였다. 디지털 빔 포밍의 결과를 보면 각 채널의 부엽 레벨(sidelobe level)이 -27 dB로 형성되는 것을 확인할 수 있다.

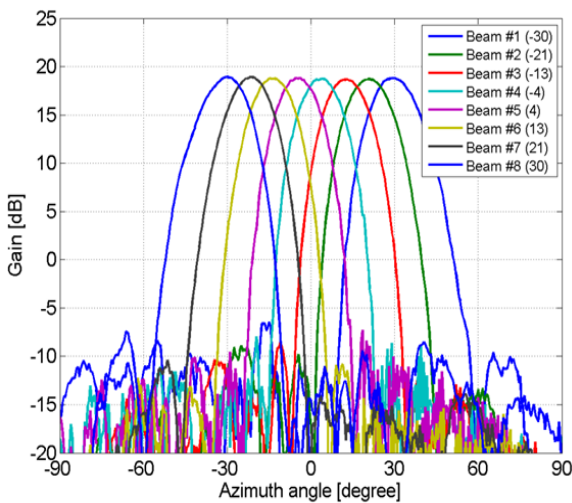


Fig. 6. Azimuth pattern of digital beamforming

마. 시험결과

본 절에서는 차량용 FMCW 레이더의 신호처리부에서 제안된 신호처리 절차를 이용하여 표적의 거리정보와 속도정보를 획득하기 위한 시험에 대해서 기술하였다. 자율주행 무인차량용 FMCW 레이더의 시험을 하기 위한 환경은 W밴드의 주파수에서 200 MHz의 대역폭을 가진다. Fig. 7은 FMCW 레이더의 성능을 검증하기 위한 시험환경을 나타낸다. FMCW 레이더와 코너 반사 표적간이 거리는 12 m 거리로 설정하였다.

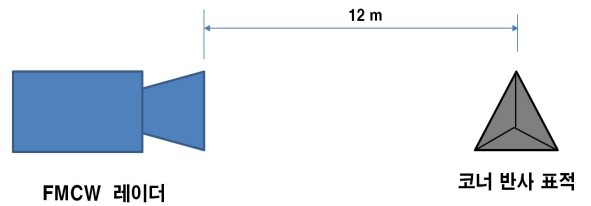


Fig. 7. FMCW radar test environment

Fig. 8은 실제 제작한 자율주행 무인차량용 FMCW 레이더 신호처리기 보드의 형상을 나타내고 있다. 레이더 수신부에서 신호를 수신하는 채널은 8개의 ADC (Analog-to-Digital Converter)로 구성하였다.

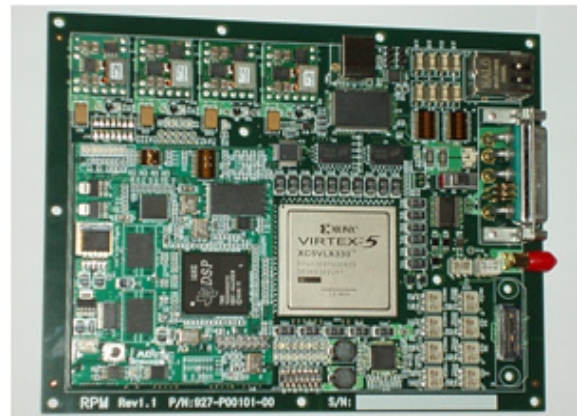


Fig. 8. FMCW radar signal processing board form

자율주행 무인차량용 FMCW 레이더에서 표적에 대한 정보를 획득하기 위해서 본 논문에서 제작한 신호처리기에서는 송신 신호와 수신 신호의 차이를 이용한 deramp 신호 처리 방식을 이용하였다. 이렇게 deramp 신호 처리 방식을 이용하면 Fig. 9에서 나타난 것과 같이 레이더의 송신신호와 표적에서 반사된 수신신호에

의한 거리에 따른 시간지연 만큼의 과도 영역(transient region) 발생한다. Fig. 9는 FMCW 레이더의 과도영역(transient region)의 발생 원리를 나타낸다.

본 논문에서는 이러한 과도 영역에 의해 문제점을 해결하기 위해서 ADC 로깅 데이터의 과도 영역(transient region)에 대해 클리핑(clipping)을 적용하였다.

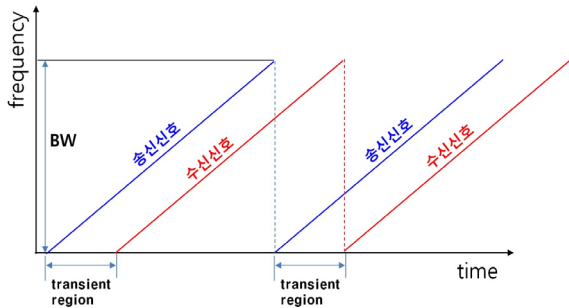


Fig. 9. The fundamental principles of transient region for FMCW radar

FMCW 레이더의 소형화 및 경량화를 위해서 레이더 송·수신기의 구조를 호모다인(homodyne) 구조로 설계하였다. 그러나 이렇게 레이더의 송·수신기를 호모다인 구조로 제작하면 레이더의 표적 반사 신호를 수신할 때 송신 신호가 수신 신호에 흘러 들어가는 누설(leakage) 현상이 발생한다. 이러한 호모다인 구조로 인한 누설 성분은 저주파 성분으로 본 논문에서는 호모다인 구조로 인한 누설 현상을 HPF(High Pass Filter)를 이용함으로써 해결하였다.

다음의 Fig. 10은 FMCW 레이더 수신 신호에 대한 클리핑과 Hanning 윈도우 함수를 적용하기 전과 후에 대한 ADC 로깅(logging) 데이터에 대한 결과를 나타내고 있다. 과도영역에 대한 클리핑 영역(clipping region)을 ADC 로깅 데이터에 대해 30개의 셀에 대해서 클리핑하였다. 그리고 이러한 누설(leakage) 성분 및 과도현상에 의한 신호의 왜곡현상의 문제점을 해결하고 신호의 안정성을 확보하기 위해서 자율주행 차량용 레이더 수신 신호에 윈도우 함수를 적용하였다. 클리핑 및 HPF를 수행한 ADC 로깅 데이터에 대한 윈도우는 Hanning 윈도우 함수를 적용하였다. Fig. 10의 결과를 보면 과도영역에 대한 신호가 제거되고, 각 수신 채널에서 수신신호가 안정화 되는 것을 확인할 수 있다.

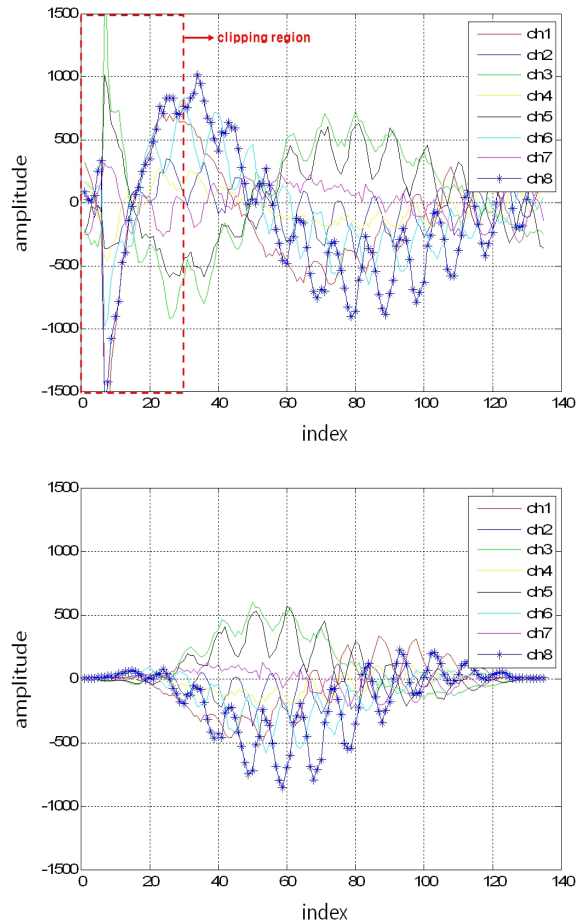


Fig. 10. FMCW ADC logging data, (above) ADC logging data before applying clipping and window function (below) ADC logging data after applying clipping and window function

Fig. 11은 FMCW 레이더의 신호처리부에서 1차 FFT 신호처리를 수행한 결과를 보여주고 있으며, 본 논문에서 제시한 신호처리 절차를 수행결과로서 표적이 12 m에서 정확하게 탐지되는 것을 볼 수 있다. 클리핑 및 윈도우 함수 적용 전의 결과를 보면 1 m 근방의 신호는 송·수신기의 호모다인 구조에 의해 발생한 누설(leakage) 성분에 의해서 발생한 성분이다. 호모다인 구조에서 발생한 누설성분은 저주파 성분으로 HPF(High Pass Filter)를 이용하여 제거하였다. 따라서 본 레이더 시스템의 최소탐지 거리를 2 m로 설정하였다. 여기서 표적과 누설성분을 제외한 다른 피크 값들은 실제 환경을 고려하여 야외에서 시험을 했기 때문에

클러터와 노이즈 성분이 시험데이터에 섞여서 나타난 현상이다. 또한 그림의 결과를 보면 윈도우 함수의 영향으로 부엽레벨이 낮아지고 신호가 안정화 되는 것을 확인할 수 있다.

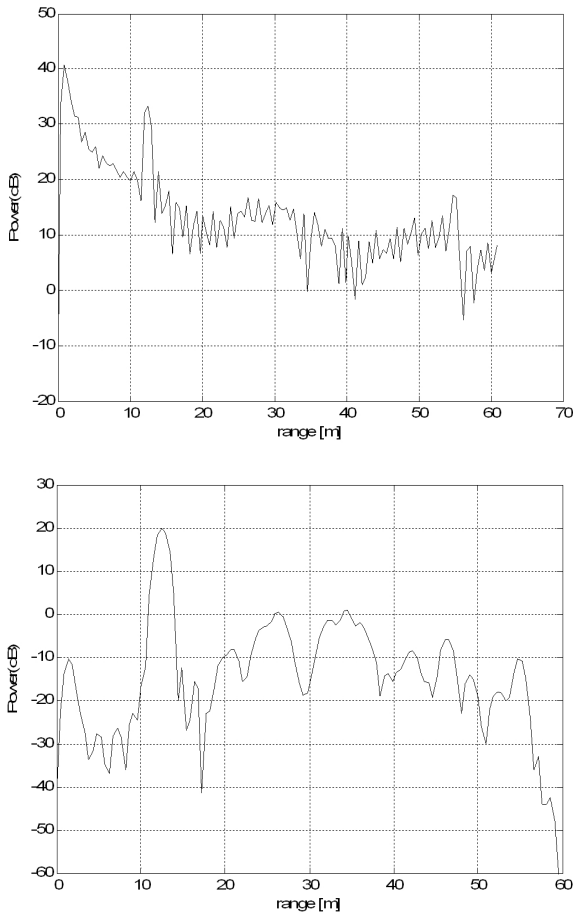


Fig. 11. The result of the 1st FFT processing, range information of the target, (above) Before applying clipping and Hanning window function (below) After applying clipping and Hanning window function

Fig. 12는 FMCW 레이더의 2차 FFT 신호처리 결과를 보여주고 있으며, 가로축은 range[m]로 거리를 나타내고 세로축은 velocity(m/s)로 표적의 속도를 나타낸다. 그림의 결과를 보면 표적이 12 m에서 정확하게 탐지되고 있으며, 정지 표적에 대한 속도가 0 m/sec로 정확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

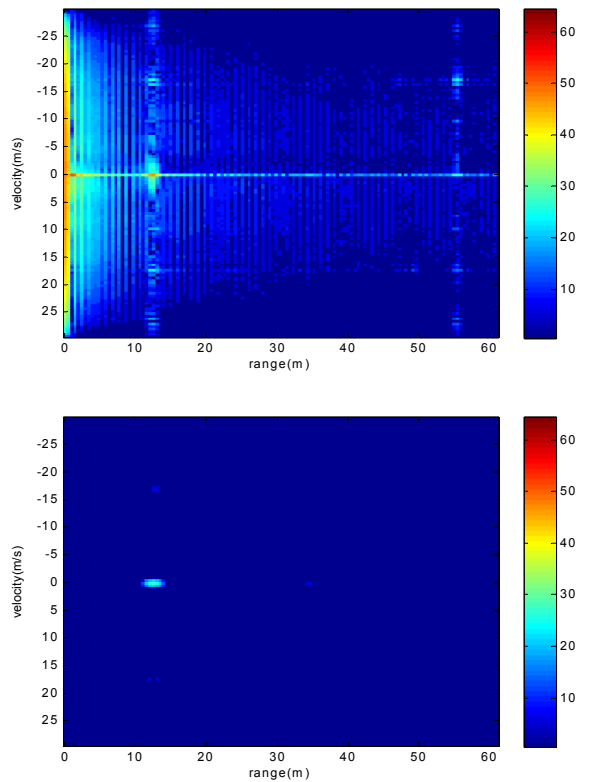


Fig. 12. The result of the 1st and 2nd FFT processing, range and velocity information of the target, (above) Before applying Hanning & Chebyshev window function (below) After applying Hanning & Chebyshev window function

앞부분의 신호는 송·수신기의 호모다인 구조에 의해 발생한 누설(leakage) 성분에 의해서 발생한 성분이다. 또한 그림의 결과를 보면 ADC로깅 데이터에 클리핑을 수행한 후 1차 FFT와 2차 FFT 신호처리 절차를 수행함에 있어서 Hanning 윈도우와 Chebyshev 윈도우 함수를 적용하여 표적에 대한 위치 및 속도 정보를 정확하게 획득할 수 있음을 확인할 수 있으며 영상의 퍼짐 현상도 해결할 수 있다.

다음으로 본 논문에서 제시한 자율주행 무인차량용 레이더의 신호처리부의 성능을 검증하기 위해 이동표적(차량)에 대한 시험결과에 대해 나타낸다. Fig. 13은 이동표적에 대한 레이더 시험 환경을 나타내며 차량이 20 m의 거리와 방위각 25도 정도에서 레이더의 가시선(line of sight) 방향으로 25 km/h 정도의 속도로 진행하도록 하였다.

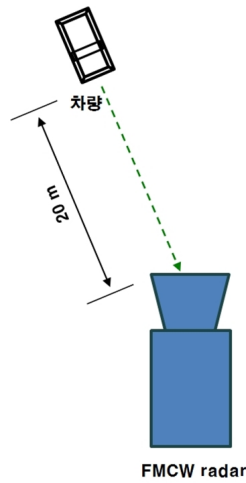


Fig. 13. Radar test environment for the moving target

Fig. 14는 이동차량에 대한 클리핑과 Hanning 윈도우를 적용한 후의 ADC 로깅 데이터를 나타낸 것으로 신호가 안정화 되는 것을 확인 할 수 있다.

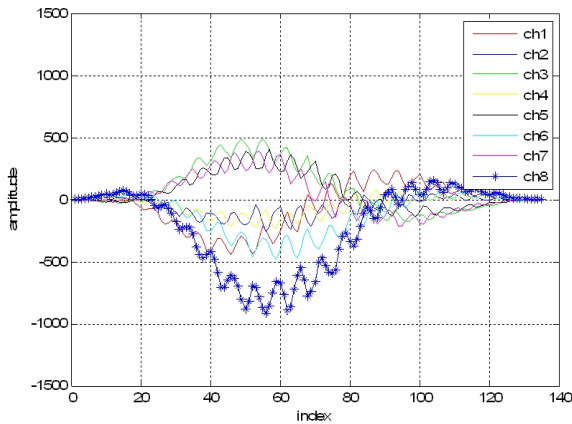


Fig. 14. ADC logging data after applying clipping and window function for the moving target

Fig. 15는 이동표적 차량에 대한 레이더의 신호처리 부에서 1차 FFT 신호처리를 수행한 결과를 보여주고 있으며, 표적이 20 m 근방에서 탐지되는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제시한 신호처리 방법인 클리핑과 윈도우를 적용하여 호모다인구조에서 오는 누설성분이 확실히 제거됨을 볼 수 있다. 여기서 표적과 누설성분을 제외한 다른 피크 값들은 야외 시험환경에서 나타나는 클러터와 노이즈 성분이다.

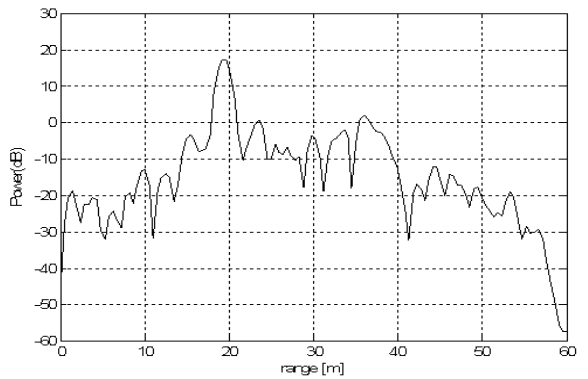
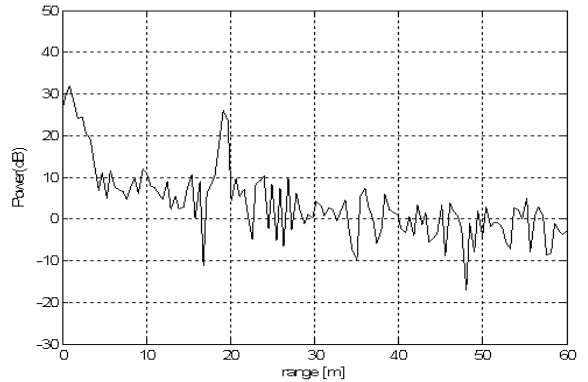


Fig. 15. The result of the 1st FFT processing for the moving target, range information of the target, (above) Before applying clipping and window function (below) After applying clipping and window function

Fig. 16은 이동표적에 대한 FMCW 레이더의 2차 FFT 신호처리 결과를 보여주고 있으며, 가로축은 range[m]로 거리를 나타내고 세로축은 velocity(m/s)로 표적의 속도를 나타낸다. 그림의 결과를 보면 표적이 20 m 근방에서 정확하게 탐지되고 있으며, 이동 차량 표적에 대한 속도가 7 m/sec로 정확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

앞부분의 신호는 송·수신기의 호모다인 구조에 의해 발생한 누설(leakage) 성분에 의해서 발생한 성분이다. 또한 그림의 결과를 보면 ADC로깅 데이터에 클리핑을 수행한 후 1차 FFT와 2차 FFT 신호처리 절차를 수행함에 있어서 Hanning 윈도우와 Chebyshev 윈도우 함수를 적용하여 표적에 대한 위치 및 속도 정보를 정확하게 획득할 수 있음을 확인할 수 있으며 영상의 퍼짐 현상도 해결할 수 있다.

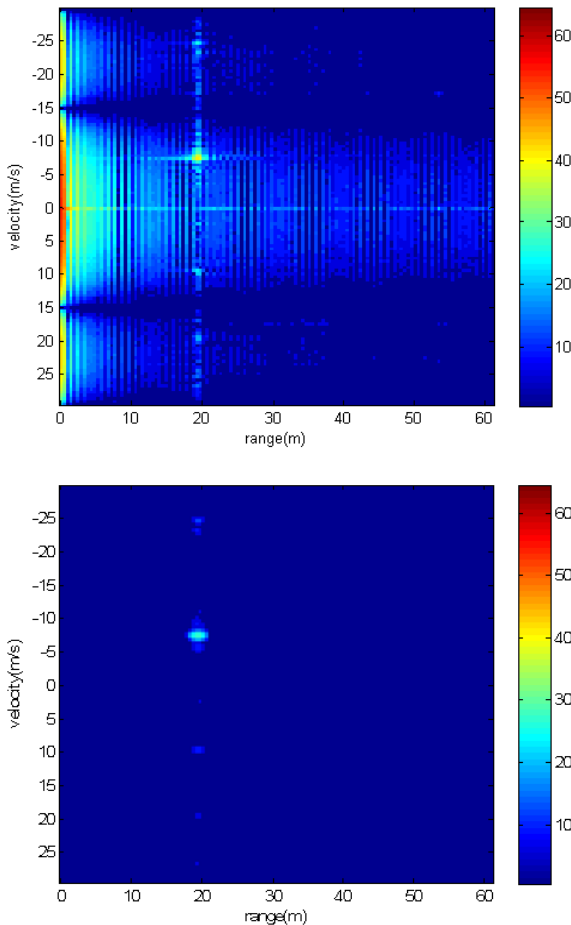


Fig. 16. The result of the 1st and 2nd FFT processing for the moving target, range and velocity information of the target, (above) Before applying Hanning & Chebyshev window function (below) After applying Hanning & Chebyshev window function

Fig. 17은 이동표적의 진행방향에 대한 디지털 빔포밍(digital beamforming)의 결과를 나타낸다. 본 논문에서 제작한 신호처리기는 수신 채널이 8개의 ADC로 구성되어 있으며, 방위각 탐지 범위가 -30도에서 +30도이다. 따라서 빔들간의 간격이 9도와 8도의 간격으로 각각 -30도, -21도, -13도, -4도, +4도, +13도, +21도, +30도에서 수신빔이 형성된다. 시험에 사용한 표적이 방위각 방향으로 -25도에서 진행하는 차량이므로 -30도 빔과 -21도 빔에 형성되는 것을 그림의 결과로서 확인할 수 있다.

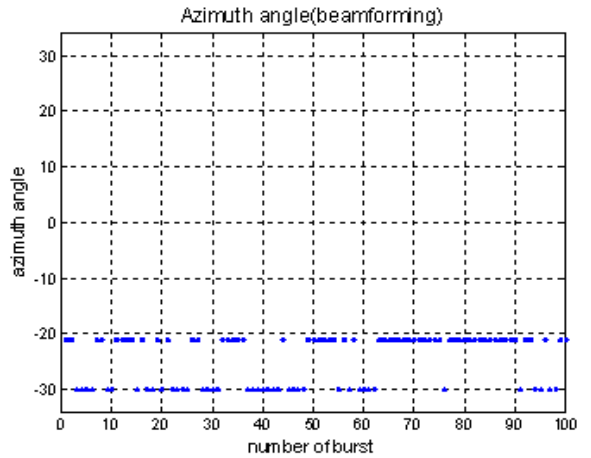


Fig. 17. The result of digital beamforming for the moving vehicle target

3. 결론

본 논문에서는 자율주행 무인차량에서 미 확인된 표적에 대한 거리, 속도 및 방위각에 대한 정보를 효과적으로 추출하기 위한 FMCW 레이더의 신호처리 구조와 절차에 대해 기술하였다. 자율주행 무인차량용 FMCW 레이더에 대한 고정표적과 이동표적의 실제 시험을 통해 레이더 신호처리에 대한 절차를 검증하였고 성능을 입증하였다.

References

- [1] Rohling H., Meinecke M., “Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems”, Radar, 2001 CIE International Conference on Proceedings, pp. 1~4 Oct., 2001.
- [2] W. Chang, L. Huan, L. Yubai, “A Practical FMCW Radar Signal Processing Method and Its System Implementation”, in Int. Conf. ITS Telecomm., pp. 1195~1199, 2006.
- [3] Volker Winkler, “Range Doppler Detection for Automotive FMCW Radar”, Proceedings of the 4th IEEE European Radar Conference, pp. 166~169, October, 2007.
- [4] 신승용, 박상현, “차량용 FMCW 레이더 신호처리

- 개발”, 한국통신학회 추계 마이크로파 및 전파학술 대회, p. 41, 2012년.
- [5] 김민준, 천이환, 김주현, “Real FFT를 이용한 FMCW 레이더 신호처리”, 한국해양 정보통신 학회논문지, 제11권 제12호, pp. 2227~2232, 2007년.
- [6] 오우진, 이종훈, “차량용 FMCW 레이더 신호처리부 개발 및 주행시험”, 한국해양 정보통신 학회논문지, 제14권 제7호, pp. 1565~1571, 2010년.